

Neutrinos: la luz invisible

Michele Maltoni

Instituto de Física Teórica UAM/CSIC

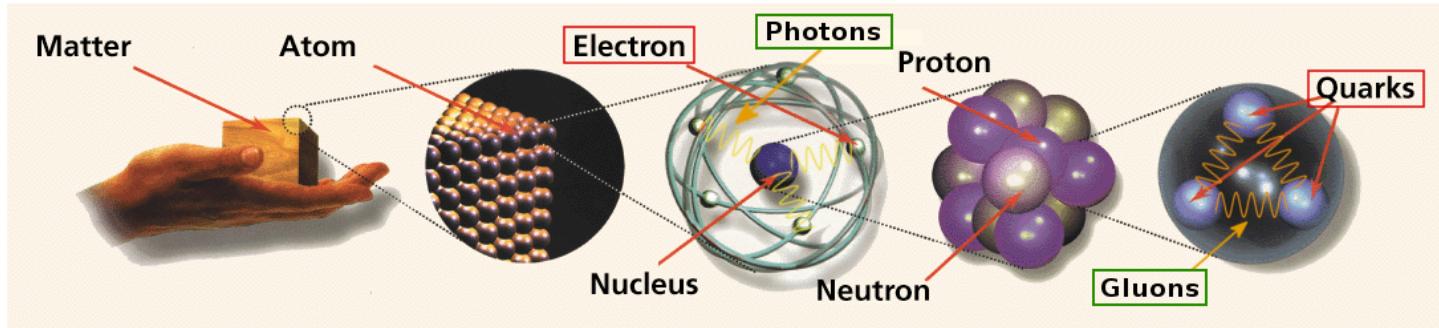
Semana de la Ciencia 2015

Residencia de Estudiantes (CSIC, Madrid) – 5 de Noviembre de 2015



Las partículas elementales: ¿de qué estamos hechos?

- La materia que conocemos está hecha de **átomos**;
- los **átomos** consisten en un **núcleo central** rodeado por **electrones**;
- los **núcleos** están compuestos por **protones** y **neutrones**;
- los **protones** y **neutrones** están formados por **quarks “up”** y **quarks “down”**, unidos entre sí por **gluones**;
- la luz, y en general la radiación electromagnética, consta de **fotones**;
- así que todo lo que nos rodea está formado por unas pocas partículas elementales...



Partículas elementales: ¿hay algo más?

- Cientos de diferentes tipos de partículas han sido observados en los aceleradores como el LHC del CERN;
- todas se pueden reducir a 17 partículas fundamentales;
- la teoría que describe estas partículas se denomina Modelo Estándar;
- el Modelo Estándar lo explica **todo** (excepto gravedad, materia oscura, energía oscura...)

	I	II	III	
mass →	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	
charge →	0	0	0	
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
name →	V _e electron neutrino	V _μ muon neutrino	V _τ tau neutrino	
Leptons				
	0.511 MeV/c ² -1 $\frac{1}{2}$ e electron	105.7 MeV/c ² -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.777 GeV/c ² -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	
	2.4 MeV/c ² $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	1.27 GeV/c ² $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	171.2 GeV/c ² $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	
	4.8 MeV/c ² - $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV/c ² - $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV/c ² - $\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	
Quarks				
	80.4 GeV/c ² ± 1 1 W ⁺ W boson			
	125,9 GeV 0 0 Higgs Boson			
Gauge Bosons				
				Dark Matter
				Gravity

Partículas estables y partículas inestables

- De las 17 partículas del Modelo Estándar:
 - 9 son inestables:** aunque se crean, desaparecen rápidamente;
 - 8 son estables:**
 - 5 de ellas forman todo lo que nos rodea (e, u, d, γ, g);
 - pero de las otras 3 (ν_e, ν_μ, ν_τ) todavía no hemos hablado...
- ¿Qué pasa con los **tres neutrinos**?

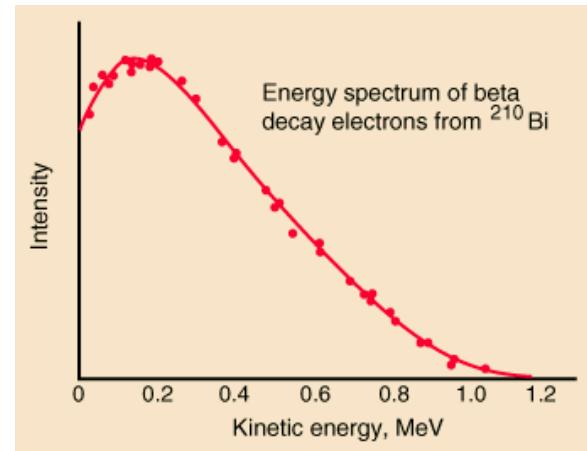
	I	II	III	
mass	$<2.2 \text{ eV}/c^2$	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$	0
charge	0	0	0	1
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
name	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	γ photon
Leptons				
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon
Quarks				
	$2.4 \text{ MeV}/c^2$	$1.27 \text{ GeV}/c^2$	$171.2 \text{ GeV}/c^2$	
	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
	u up	c charm	t top	Z^0 Z boson
	$4.8 \text{ MeV}/c^2$	$104 \text{ MeV}/c^2$	$4.2 \text{ GeV}/c^2$	
	- $\frac{1}{3}$	- $\frac{1}{3}$	- $\frac{1}{3}$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
	d down	s strange	b bottom	W^\pm W boson
Gauge Bosons				
	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	125.9 GeV		
	± 1	0		
	1	0		
		0		
		0		
				Higgs Boson

Descubrimiento de los neutrinos

- Al final del 1800 se descubrió la radioactividad, y tres tipos de partículas fueron identificados: α , β , γ .
 β : un electrón que sale del núcleo radioactivo.
- Conservación de la energía \Rightarrow la energía del electrón e^- está fijada únicamente:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 1) + e^- \quad \Rightarrow \quad E_e = M(A, Z + 1) - M(A, Z)$$

- Pero en 1914 James Chadwick demostró que el espectro de energía del e^- es continuo:



\Rightarrow ¿Abandonamos la conservación de la energía?

Descubrimiento de los neutrinos

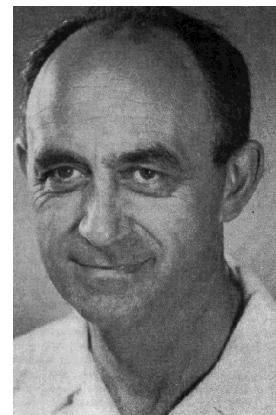
- La idea del neutrino llegó en 1930, en un intento desesperado de W. Pauli para salvar el “principio de conservación de la energía”.



En una carta dirigida a los “Liebe Radioaktive Damen und Herren” (Estimados Señoras y Señores Radioactivos) durante una conferencia en Tübingen, propuso la hipótesis que dentro de los núcleos existe una nueva partícula, el “neutrón” ν , responsable del espectro continuo observado en los decaimientos beta:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 1) + e^- + \nu$$

- El ν es **ligero** (en palabras de Pauli: “la masa del ν tiene que ser del mismo orden que la del e^- ”), **neutro**, y tiene **espín 1/2**;
- Para distinguirlos de los neutrones pesados que hoy conocemos, Fermi propuso llamarlos **neutrinos**.



Descubrimiento de los neutrinos

- Los (anti)neutrinos electrónicos producidos en las reacciones de **fisión nuclear**, ${}_{Z}^{A}\text{X} \rightarrow {}_{Z+1}^{A}\text{X}' + e^- + \bar{\nu}_e$ ($E_\nu \sim \text{MeV}$), se observaron de manera definitiva en Hanford en 1956 a través del *decaimiento beta inverso*: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$;
⇒ Premio Nobel: Reines, 1995
 - Los neutrinos muónicos producidos en el **decaimiento del pión cargado**, $\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$ ($E_\nu \sim \text{GeV}$), se observaron en Brookhaven en 1962 mediante *aparición de muones*:
 $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$ & $\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$;
⇒ Premio Nobel: Lederman, Schwartz & Steinberger, 1988
 - Los neutrinos tauónicos producidos en el **decaimiento de mesones “encantados”**, principalmente $D_S \rightarrow \tau + \nu_\tau$ ($E_\nu \sim 100 \text{ GeV}$), se observaron en el experimento DONUT a Fermilab en 2000 a través de *aparición de tau*: $\nu_\tau + N \rightarrow \tau + X$. Las trazas de los τ se diferencian de las de los μ debido al rápido decaimiento de los tauones, que produce una “torcedura” en la traza después de aproximadamente 2 mm.
- ⇒ Los neutrinos **existen**. Además, vienen en **tres diferentes sabores!**

Propiedades de los neutrinos: interacciones

- Interacciones de los neutrinos:

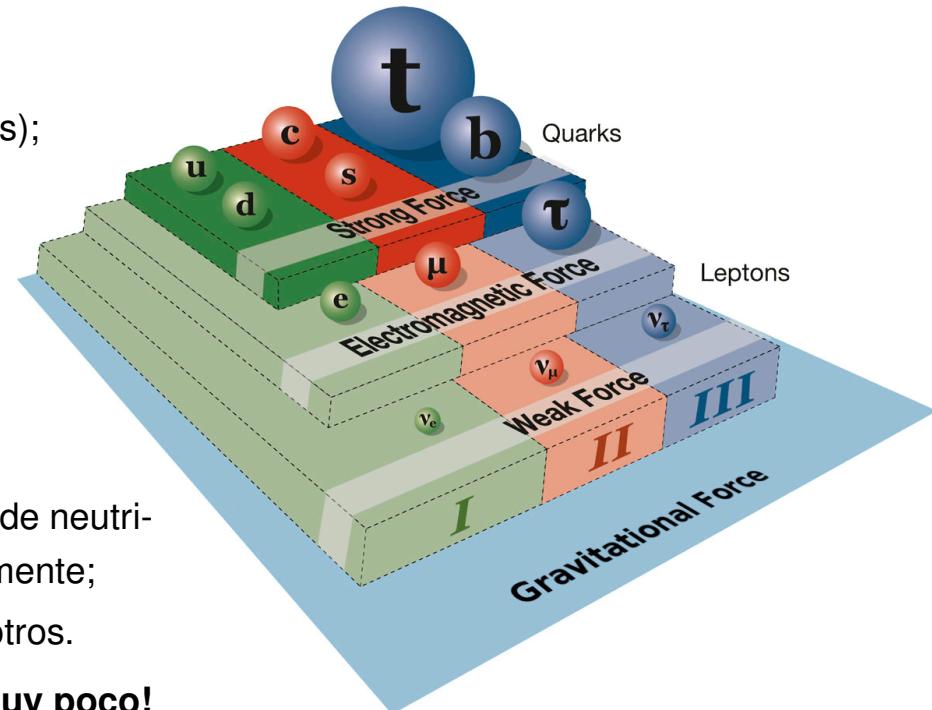
- ✗ fuertes (son leptones);
 - ✗ electromagnéticas (son neutros);
 - débiles;
 - gravitacionales;

- Ejemplo: neutrinos atmosféricos:

$$\Phi_{\nu}^{\text{ATM}} = 1 / \text{cm}^2 / \text{segundo};$$

- en nuestra vida:

- nos atraviesan **un billón** (10^{12}) de neutrinos atmosféricos aproximadamente;
 - solo ≈ 1 interacciona con nosotros.

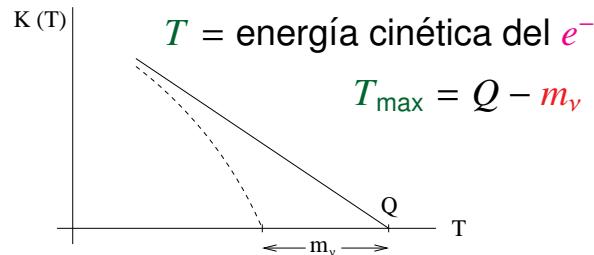


⇒ ¡los neutrinos interaccionan muy poco!

- Por eso es tan difícil verlos, y para conseguirlo se necesitan detectores muy grandes.

Propiedades de los neutrinos: masa

- Fermi propuso medir la masa del neutrino ν_e observando el espectro de los decaimientos beta del tritio: ${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$
- $m_\nu \neq 0 \Rightarrow$ distorsión al final del espectro:

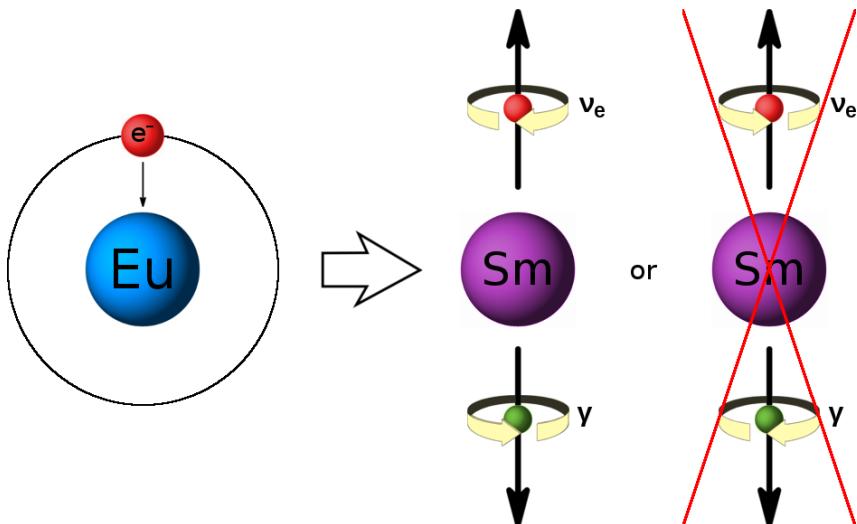


- Límite actual (experimento MAINZ & TROISK):
 $m_{\nu_e} \lesssim 2,2 \text{ eV}$. El experimento KATRIN se propone mejorarla hasta $m_{\nu_e} \lesssim 0,2 \text{ eV}$;
 - Límite cosmológico: $\sum m_{\nu_i} \lesssim 0,5 \text{ eV}$;
- ⇒ parece que los neutrinos no tienen masa...



Propiedades de los neutrinos: helicidad

- La helicidad del neutrino fue medida en 1957 por M. Goldhaber y colaboradores, usando la reacción de captura electrónica:
$$^{152}_{63}\text{Eu} + e^- \rightarrow ^{152}_{62}\text{Sm} + \nu_e + \gamma$$
;
- conservación del momento angular \Rightarrow neutrino y fotón tienen la misma helicidad \Rightarrow midiendo la polarización del fotón podemos conocer la helicidad del neutrino;
- en principio, ambas polarizaciones (levógira o dextrógira) son posibles;
- en práctica, en esta reacción solo se observan fotones (y, por lo tanto, neutrinos) levógiros;
 \Rightarrow ¡todos los neutrinos observados hasta ahora son levógiros (y los antineutrinos, dextrógiros)!



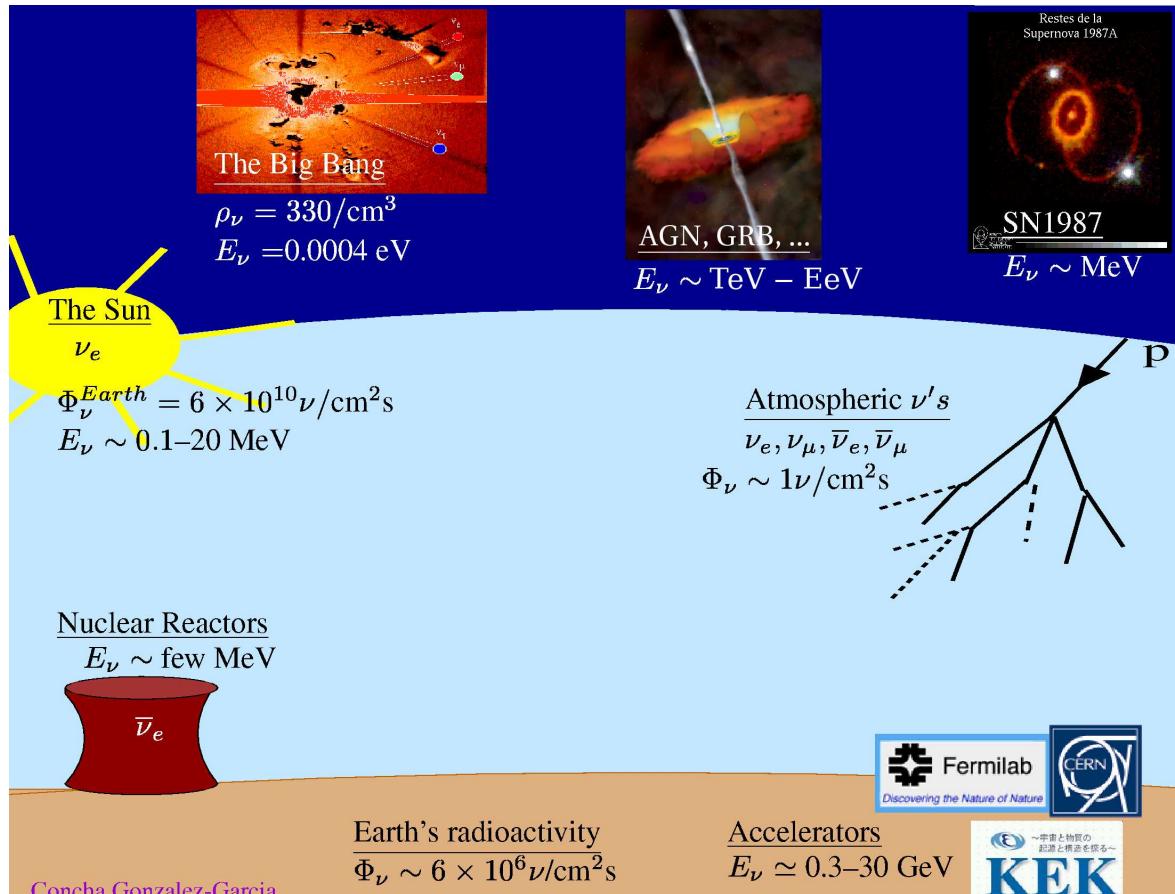
¿Cómo se observan los neutrinos?

- Una **partícula cargada** es muy fácil de ver, porque su carga eléctrica produce efectos macroscópicos;
 - una **partícula neutra** que interacciona “mucho” (por ejemplo, el **fotón**) también es fácil de detectar;
 - pero los neutrinos son neutros y muy esquivos...
 - un neutrino lo atraviesa todo pero a veces choca con la materia. Allí es cuando lo vemos.
- ⇒ **un neutrino se reconoce por las características de su “choque”.**
- en las interacciones de **corriente cargada**, el neutrino se destruye y en su lugar aparece un leptón cargado: $\nu_e \rightarrow e^-$, $\nu_\mu \rightarrow \mu^-$, $\nu_\tau \rightarrow \tau^-$ (anti- ν : $\bar{\nu}_e \rightarrow e^+$, $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \mu^+$, $\bar{\nu}_\tau \rightarrow \tau^+$):
 - son fáciles de reconocer (ejemplo: leptón cargado “que sale de la nada”);
 - hay un umbral: la energía del neutrino tiene que ser superior a la masa del leptón que se va a crear ($m_e \simeq 0,511 \text{ MeV}$, $m_\mu \simeq 106 \text{ MeV}$, $m_\tau \simeq 1776 \text{ MeV}$);
 - en las interacciones de **corriente neutra**, el neutrino pierde energía pero sobrevive:
 - Son muy difíciles de identificar, pero no hay umbral y no distinguen entre ν_e , ν_μ , ν_τ .



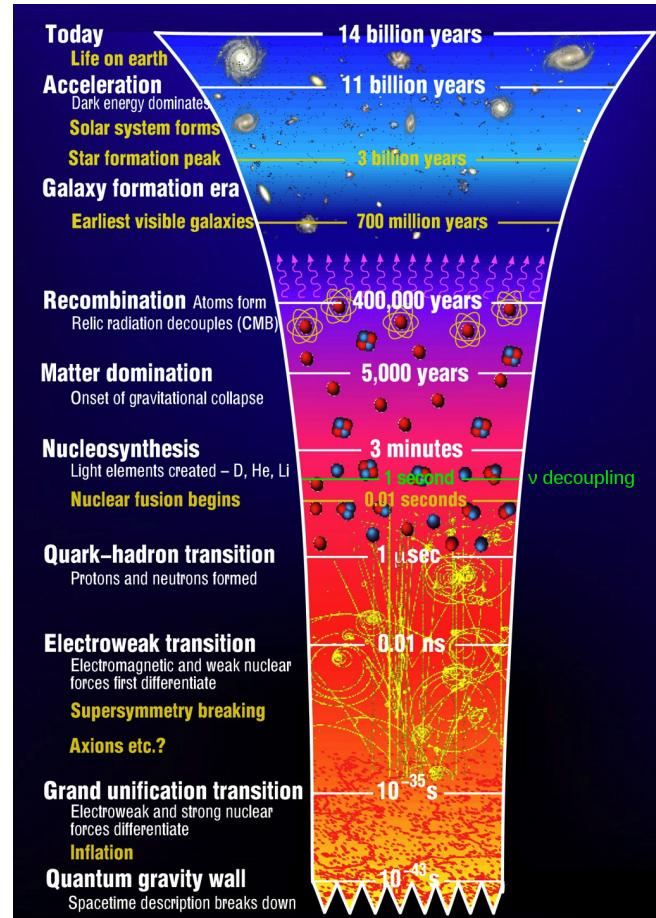
II. Fuentes de neutrinos

12



Fondo cósmico de neutrinos

- Los **neutrinos primordiales** se desacoplaron del resto de la materia aproximadamente 1 segundo después del Big Bang;
- actualmente su temperatura ($T_\nu \simeq 1,95 \text{ K}$) y su densidad ($\rho_\nu \simeq 330 \text{ v/cm}^3$) son comparables con los fotones del **fondo cósmico de microondas**;
- en el universo, por cada partícula “ordinaria” (electrón, protón o neutrón) hay **miles de millones de fotones** y de **neutrinos**;
- sin embargo, pese a ser tan abundantes no pueden ser ellos solos la “materia oscura”, porque son demasiado ligeros.



Neutrinos de supernova

- Neutrinos procedentes de la supernova 1987A fueron observados en 1987 por tres distintos detectores (IMB, Kamiokande-II, Baksan);

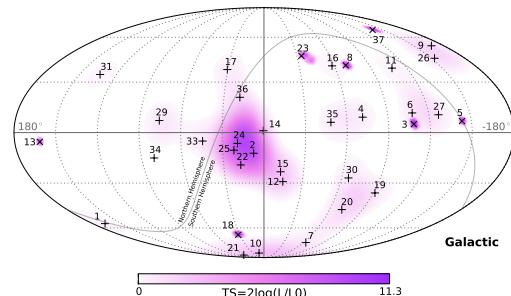


- por este descubrimiento Masatoshi Koshiba recibió parte del Premio Nobel en física 2002, «*for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos*».



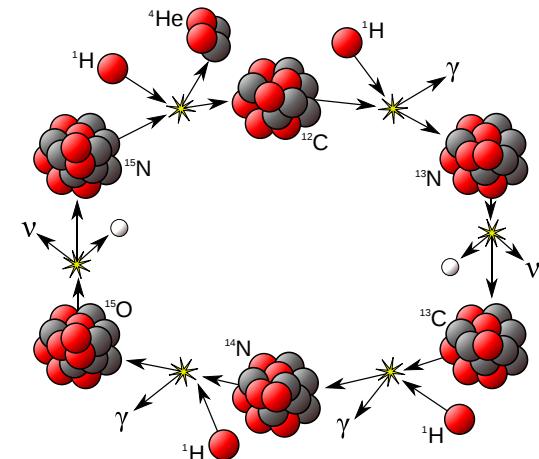
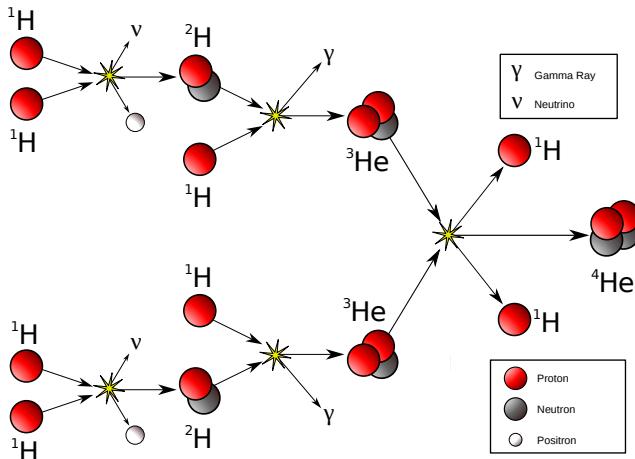
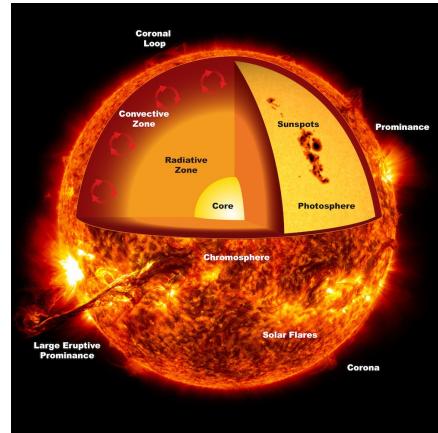
Neutrinos astrofísicos de altísima energía

- Desde 2010 el detector IceCube ha observado 37 neutrinos con energía 30 – 2000 TeV;
- la origen es claramente astrofísica, aunque todavía no ha sido posible identificar sus fuentes.



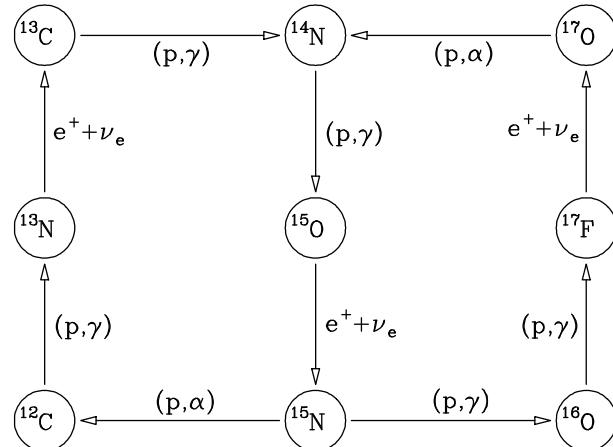
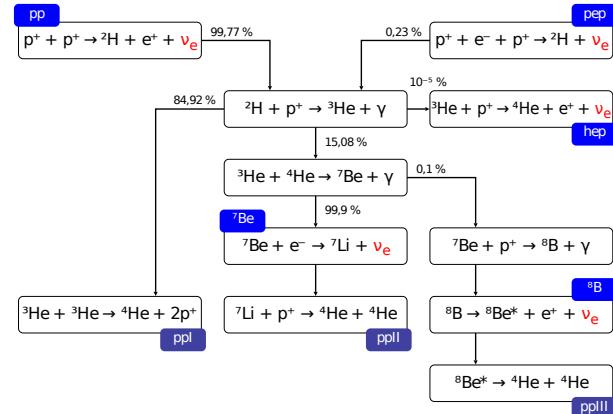
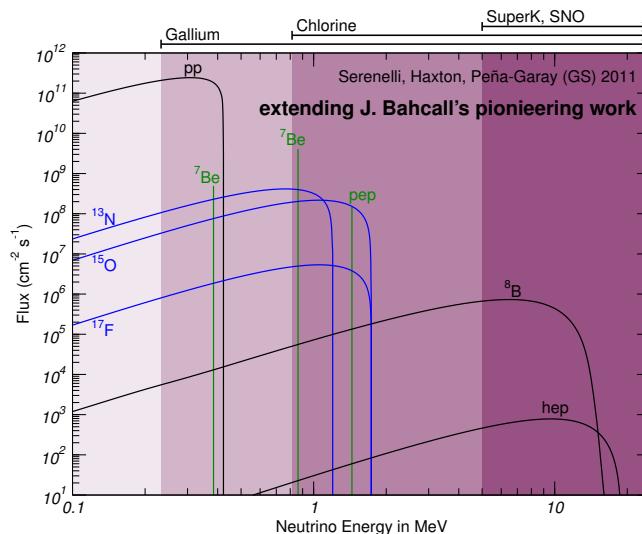
Neutrinos solares

- Los neutrinos solares son producidos por **reacciones de fusión nuclear** en el núcleo del sol;
- hay dos mecanismos principales: la **cadena protón-protón** y el **ciclo CNO**. Ambos dan $4p \rightarrow {}_2^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + \gamma$;
- de esta manera el sol produce **luz** y **neutrinos**, en proporciones recíprocas bien definidas.



Flujos de neutrinos solares

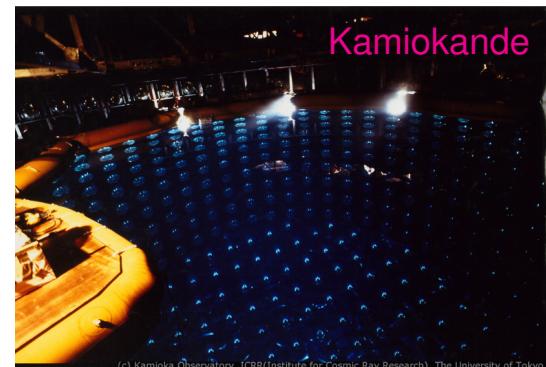
- Cada reacción de fusión nuclear produce **neutrinos electrónicos** con un **espectro de energía** característico;
- ⇒ los neutrinos solares ofrecen **información directa** sobre lo que ocurre en el núcleo del Sol.



Observación de neutrinos solares

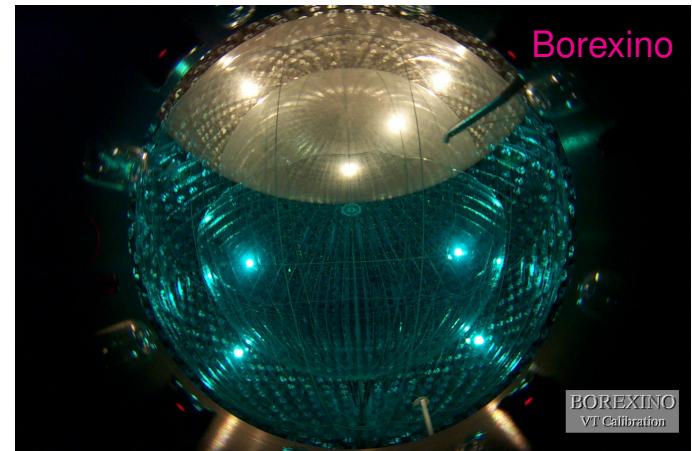
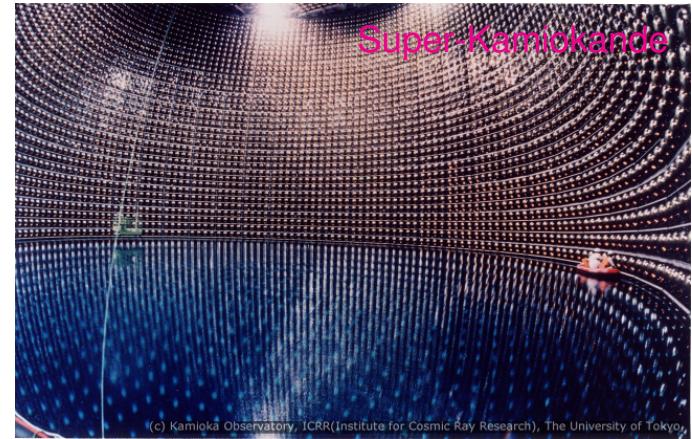
- Los neutrinos solares fueron observados desde los '70 por el experimento **Chlorine**, a través del proceso: $\nu_e + {}^{37}_{17}\text{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}_{18}\text{Ar}$ ($E_\nu \geq 0,814 \text{ MeV}$);
- en los '80 se le sumó **Kamiokande** ($E_\nu \geq 7 \text{ MeV}$) y luego **SAGE & Gallex/GNO** ($E_\nu \geq 0,233 \text{ MeV}$);
⇒ Premio Nobel: Davis & Koshiba, 2002

¿? más de la mitad de los ν esperados faltaban...



Observación de neutrinos solares

- Experimentos recientes: SNO, Borexino, Super-Kamiokande;
- todos: ν_e mucho menos de lo esperado;
- SNO: $\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ justo como esperado;
⇒ ¡conversión $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$ entre Sol y Tierra!



 **Nobelprize.org**
The Official Web Site of the Nobel Prize

Home | Nobel Prizes and Laureates | Nomination | Ceremonies | Alfred Nobel | Educational | Events

Nobel Prizes and Laureates

Physics Prizes ▾ < 2015 >

▼ About the Nobel Prize in Physics 2015
Summary
Prize Announcement
Press Release
Advanced Information
Popular Information
Greetings
▶ Takaaki Kajita
▶ Arthur B. McDonald

All Nobel Prizes in Physics
All Nobel Prizes in 2015

The Nobel Prize in Physics 2015

Takaaki Kajita, Arthur B. McDonald

Share this:     1.5K 

The Nobel Prize in Physics 2015



Photo © Takaaki Kajita
Takaaki Kajita
Prize share: 1/2

Photo: K. MacFarlane, Queen's University /SNOLAB
Arthur B. McDonald
Prize share: 1/2

The Nobel Prize in Physics 2015 was awarded jointly to Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald "for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"

 **THE FUTURE OF LEARNING**
Watch the live-stream 5 November

 **2015 Nobel Laureates**
Foto: The Nobel Foundation.

2015 PHYSICS PRIZE QUESTION

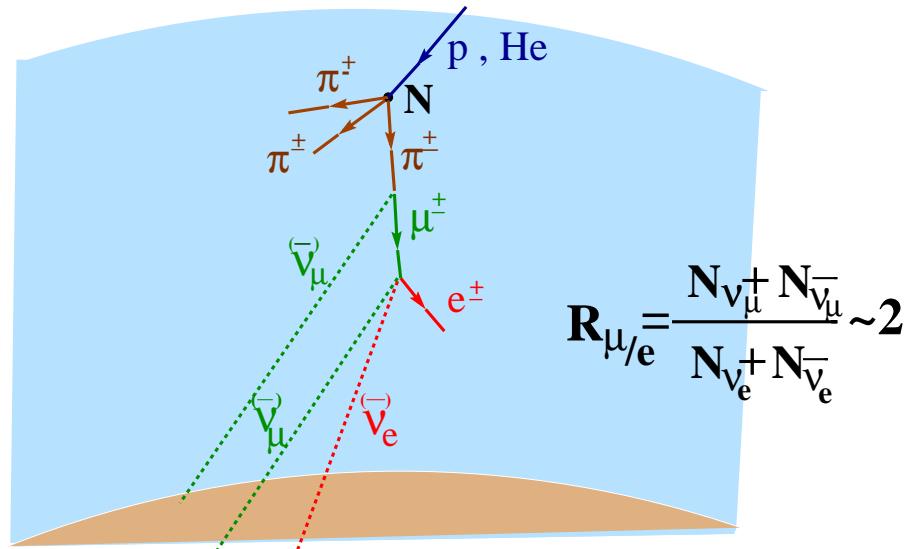
Did you know that thousands of billions of neutrinos are streaming through your body each second?

Neutrinos atmosféricos

- Los neutrinos atmosféricos se producen debido a la interacción de los *rayos cósmicos* (p , He, ...) con la atmósfera de la Tierra:

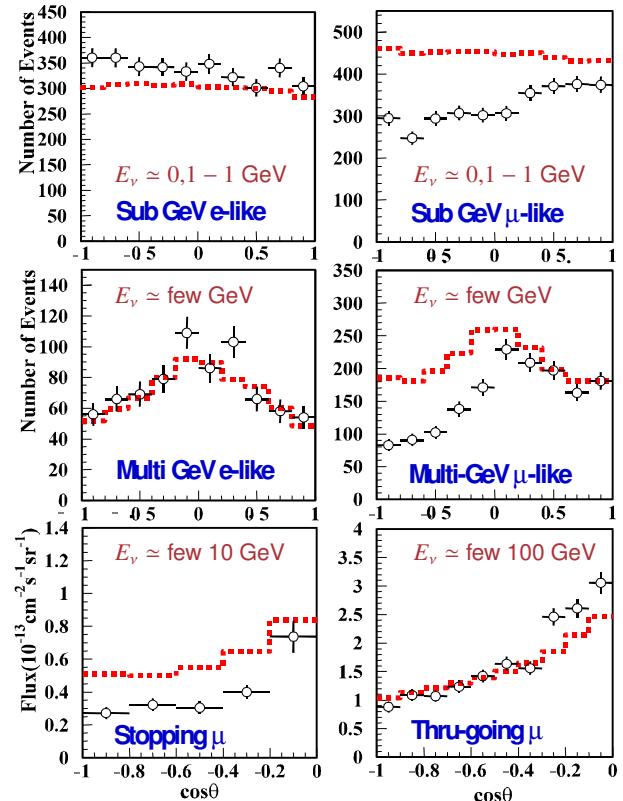
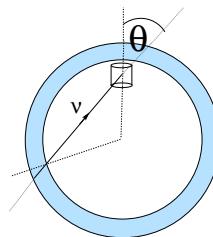
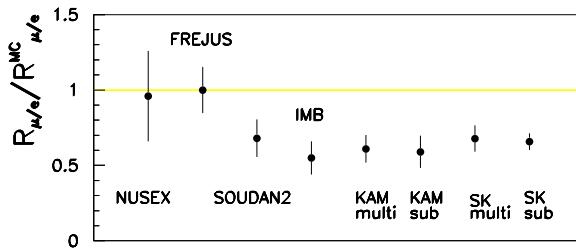
- 1 $A_{\text{cr}} + A_{\text{air}} \rightarrow \pi^\pm, K^\pm, K^0, \dots$
- 2 $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu,$
- 3 $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e + \bar{\nu}_\mu;$

- en el detector, algunos ν interactúan y producen un **leptón cargado**, que es observado;
- los flujos de ν_μ y de ν_e tienen poca precisión ($\approx 20\%$);
- sin embargo, el cociente ν_μ/ν_e se conoce con una precisión bastante buena ($\approx 5\%$).



El problema de los neutrinos atmosféricos

- en los '80: $\left\{ \begin{array}{l} \text{- no déficit en "iron calorimeters";} \\ \text{- déficit en "water Cerenkov";} \end{array} \right.$
- ¿quizás un error en los "water Cerenkov"?
- ambigüedad resuelta por Soudan2 y MACRO;
- datos actuales (SK): acuerdo en ν_e , déficit en ν_μ ;
- déficit de SK en ν_μ : $\left\{ \begin{array}{l} \text{- crece con } L; \\ \text{- decrece con } E_\nu; \end{array} \right.$
- el déficit es más grande que las incertidumbres;
- algo les pasa a los ν_μ durante su recorrido...



Neutrinos de aceleradores

- $p + \text{target} \rightarrow \text{stuff} + \pi^\pm$, luego $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$ (decay $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e + \nu_\mu$ no usado);

Exper	Length	Energy	No-osc	Observed	R	Detector
K2K	250 km	1 GeV	88 (ν_μ)	56 (ν_μ)	-	single-ring μ -like events in SK
T2K	295 km	0.6 GeV	196 (ν_μ) 4.9 (ν_e)	58 (ν_μ) 28 (ν_e)	- +	single-ring μ -like events in SK
MINOS	735 km	3 GeV	3564 (ν_μ) 464 ($\bar{\nu}_\mu$) 69 (ν_e) 10 ($\bar{\nu}_e$)	2894 (ν_μ) 357 ($\bar{\nu}_\mu$) 88 (ν_e) 12 ($\bar{\nu}_e$)	- - + +	dedicated far detector
OPERA	730 km	17 GeV	0.25 (ν_τ)	5 (ν_τ)	+	dedicated far detector

- Datos: {
 - déficit de ν_μ ;
 - exceso de ν_e ;
 - exceso de ν_τ .

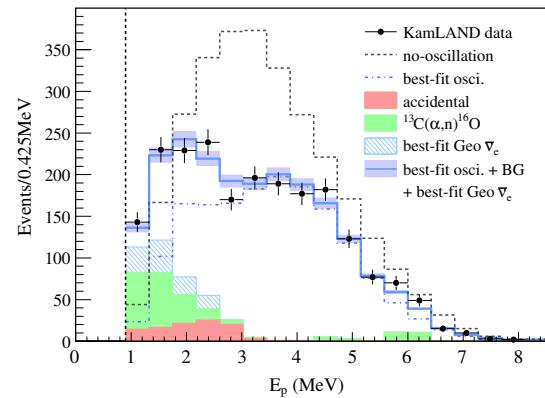
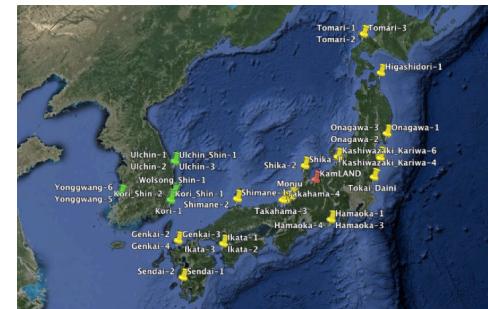
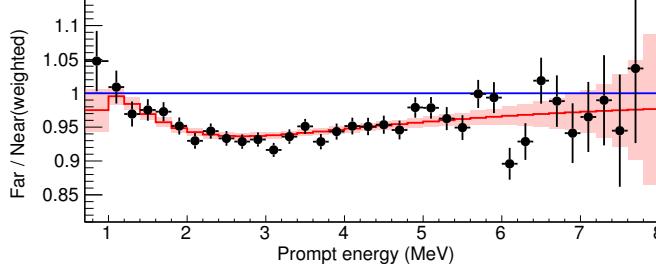
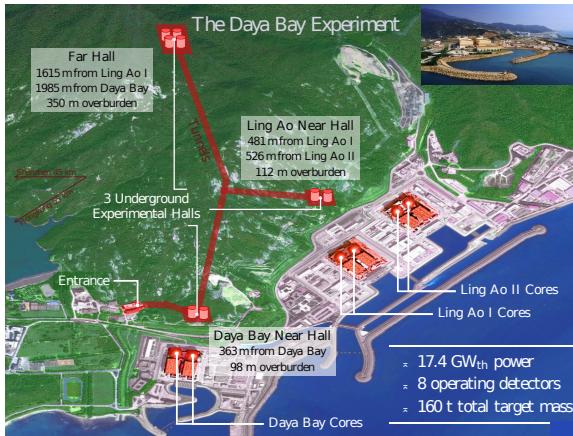
 \Rightarrow los ν cambian de sabor...



II. Fuentes de neutrinos

Neutrinos de reactores

- Datos recientes: Double-Chooz, Reno, Daya-Bay ($L \approx 1 \text{ Km}$), KamLAND ($L \approx 180 \text{ Km}$);



- Todos los experimentos observan una clara desaparición de ν_e .

Partículas y ondas

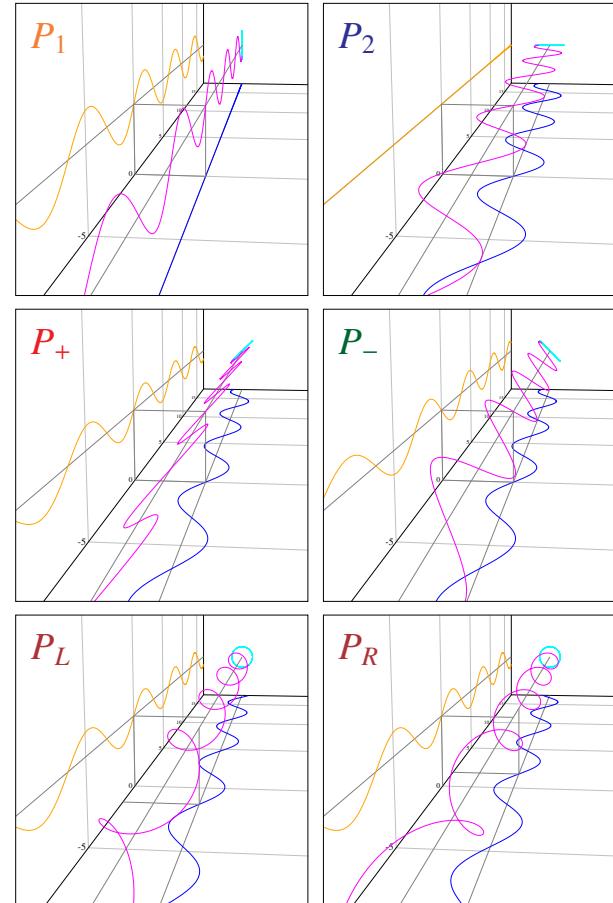
- En mecánica cuántica, las partículas son descritas por funciones de onda;
- las ondas se pueden sumar, y en general superponer una a otra:



- los estados de una partícula también se pueden superponer entre sí...

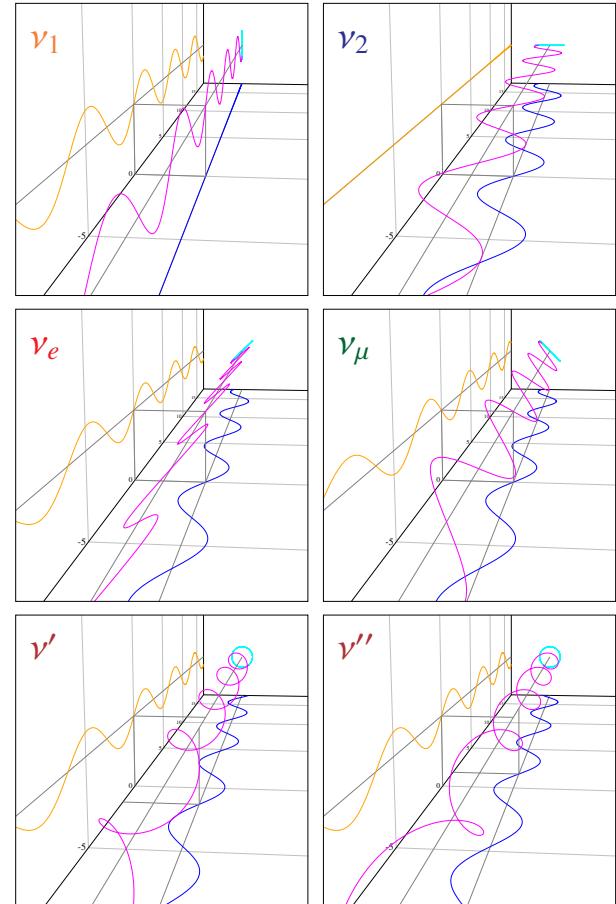
Superposición de ondas: luz

- La luz es una onda *transversal*. Además de amplitud y frecuencia, tiene polarización;
- su polarización forma un “*espacio vectorial complejo de dimensión dos*”. Esto significa que:
 - podemos elegir **dos** estados de polarización independientes (ej.: P_1 y P_2);
 - podemos expresar las **otras** polarizaciones como combinación de estas dos (ej.: P_+ y P_-);
 - podemos poner una **fase** relativa entre las dos componentes (ej.: P_L y P_R);
- cuando la luz se propaga, **todas** sus componentes avanzan con la misma velocidad;
- por lo tanto, la onda avanza pero su “forma” no varía: $P_1 \sim P_1$, $P_2 \sim P_2$, $P_+ \sim P_+$, $P_- \sim P_- \dots$



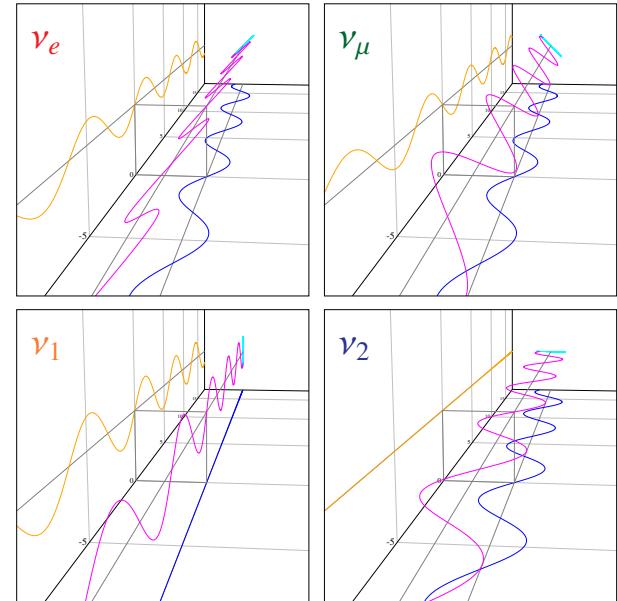
Superposición de ondas: neutrinos

- Los neutrinos también son ondas. Además de frecuencia, polarización etc., tienen sabor;
- fijémonos en 2 (ej. ν_e , ν_μ). Su sabor forma un “*espacio vectorial complejo de dimensión dos*”:
 - podemos elegir **dos** estados de sabor independientes (ej.: ν_1 y ν_2);
 - podemos expresar los **otros** sabores como combinación de estos dos (ej.: ν_e y ν_μ);
 - podemos poner una **fase** relativa entre las dos componentes (ej.: ν' y ν'');
- si los neutrinos no tuvieran masa, todas sus componentes avanzarían a la misma velocidad;
- ¿y si tienen masa? Recordamos que en nuestra analogía la “forma” representa el sabor...



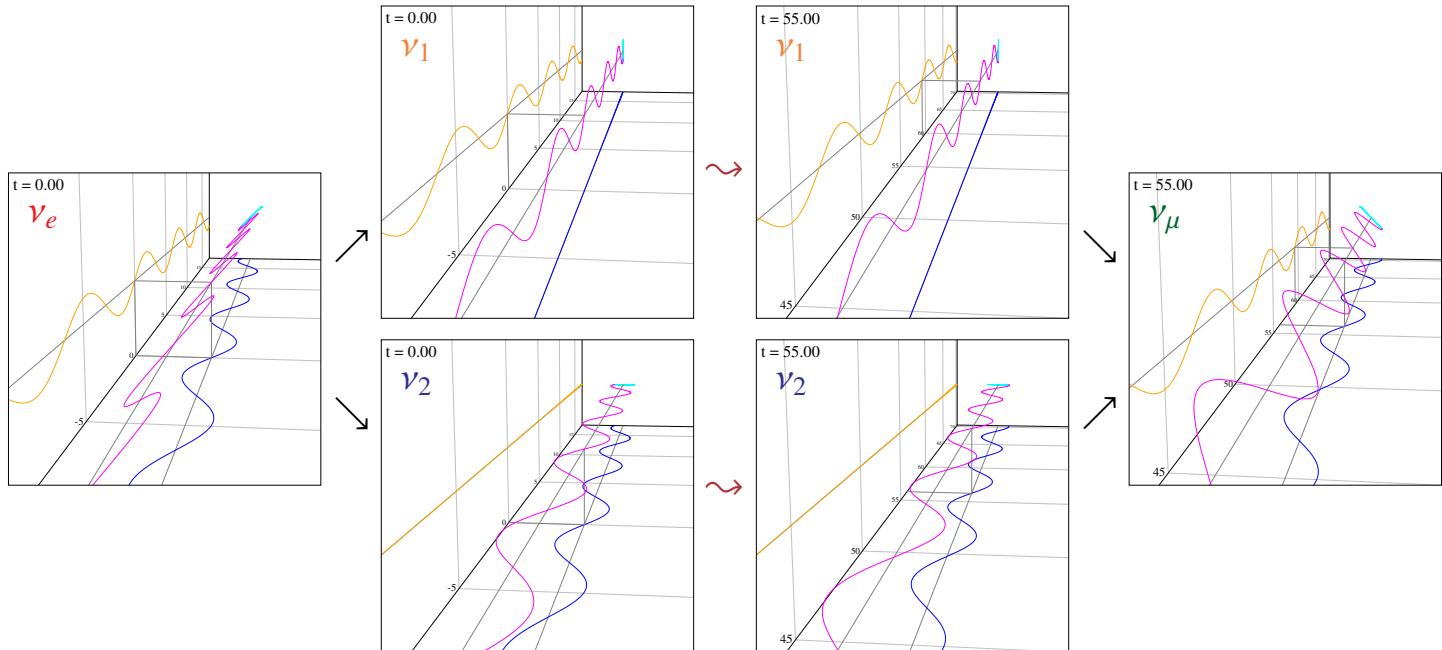
Estados con sabor definido y estados con masa definida

- En un experimento, los neutrinos **se producen**, se propagan, y se observan;
 - **producción** y **detección** suelen ser procesos de **corriente cargada**, donde el neutrino va en pareja con un lepton cargado de su mismo sabor \Rightarrow estados de **sabor definido**. Ejemplos: el Sol produce ν_e y Chlorine detecta ν_e ; T2K produce ν_μ y detecta ν_μ y ν_e ;
 - en **propagación** no cuenta el sabor, sino la **masa**. Los estados que “*mantienen la misma forma*” cuando propagan son los que tienen **masa definida**. Los llamaremos ν_1 y ν_2 .
- \Rightarrow los neutrinos de **sabor definido** **no coinciden** con los neutrinos de **masa definida**.
- la velocidad de propagación de un estado a masa definida depende de su **masa** y **frecuencia**;
 - si ν_1 y ν_2 tienen la misma frecuencia, propagarán con la **misma (diferente)** velocidad según si tienen la **misma (diferente)** masa.



Propagación de los neutrinos

- Evolución de un estado: (A) descomposición en componentes a masa definida; (B) evolución temporal (C) recomposición de las componentes.
- si ν_1 y ν_2 tienen masa diferente, al propagar acumulan una **diferencia de fase**.

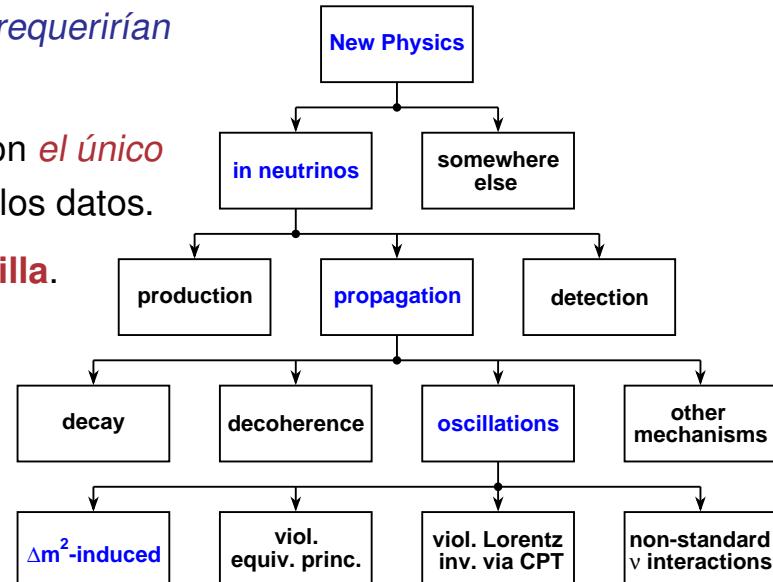


¿Por qué creemos que los neutrinos tienen masa?

- Todavía no hemos medido directamente la masa de los neutrinos;
 - en principio, hay otros modelos que predicen conversión de sabor entre neutrinos;
 - algunas anomalías (ej., ν solares) también se resuelven con estos modelos alternativos;
 - sin embargo, *experimentos diferentes requerirían explicaciones diferentes*;
- ⇒ las oscilaciones inducidas por masa son *el único* mecanismo que puede explicar **todos** los datos.
- ⇒ **La masa es la explicación más sencilla.**

Implicaciones de la masa

- El número total de ν se conserva;
- el patrón de conversión es periódico;
- las oscilaciones dependen de $1/E$.

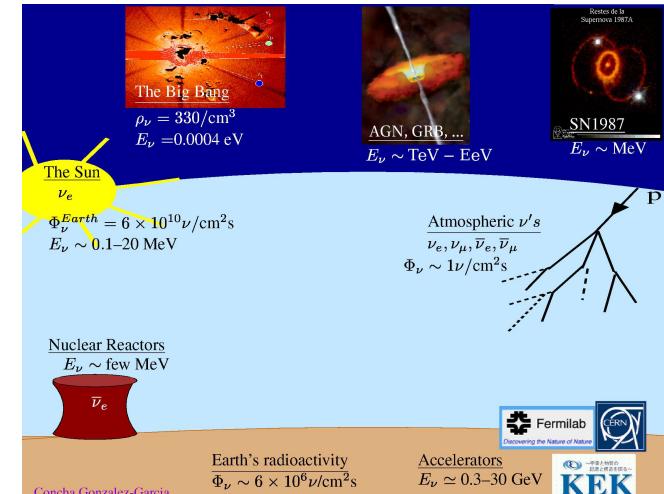


¿Por qué los ν son especiales?

- Son el único fermión elemental conocido a ser **eléctricamente neutro**;
- son **producidos abundantemente** en muchos fenómenos (naturales y humanos);
- son **estables** (las oscilaciones cambian su sabor pero preservan su número);
- interaccionan **muy débilmente**.
- Debido a todo esto, los neutrinos juegan dos roles distintos en la física moderna:

Como sujeto de estudio

- son neutros \Rightarrow propiedades únicas;
- acoplos débiles \Rightarrow aún poco conocidos;
- son leptones \Rightarrow complementarios a los quarks para el “problema del sabor”.

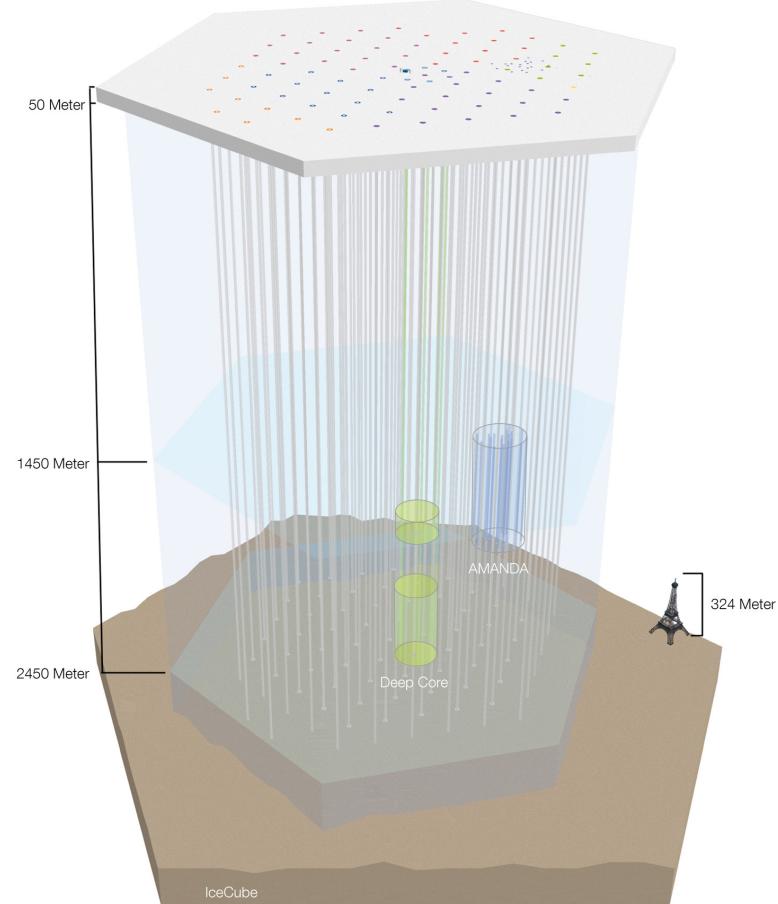
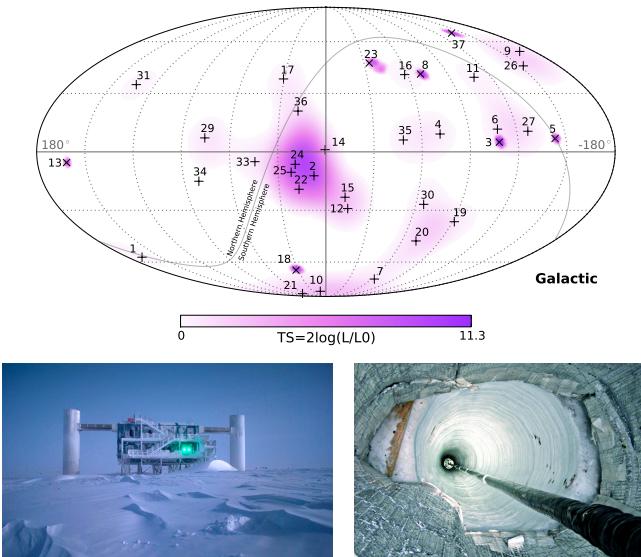


Como instrumento de trabajo

- producidos abundantemente \Rightarrow dan información sobre sus fuentes;
- acoplos débiles \Rightarrow info sin distorsiones;
- estables \Rightarrow recurren largas distancias.

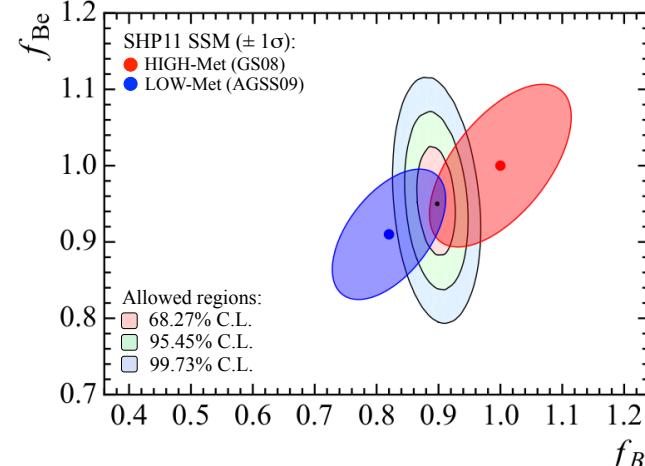
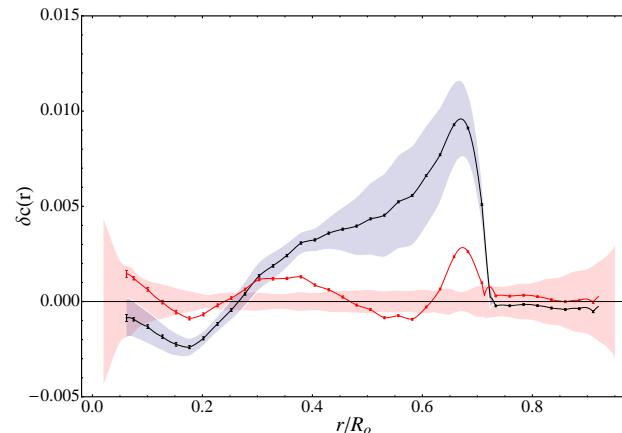
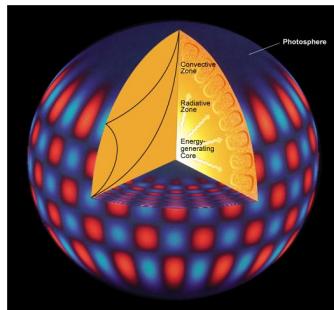
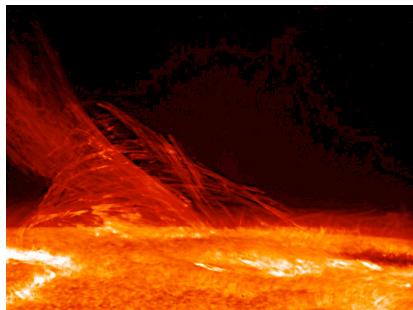
Telescopios de neutrinos

- Los **neutrinos** proporcionan información sobre las fuentes que los emiten;
- los ν no son absorbidos ni desviados: apuntan directo a su origen.



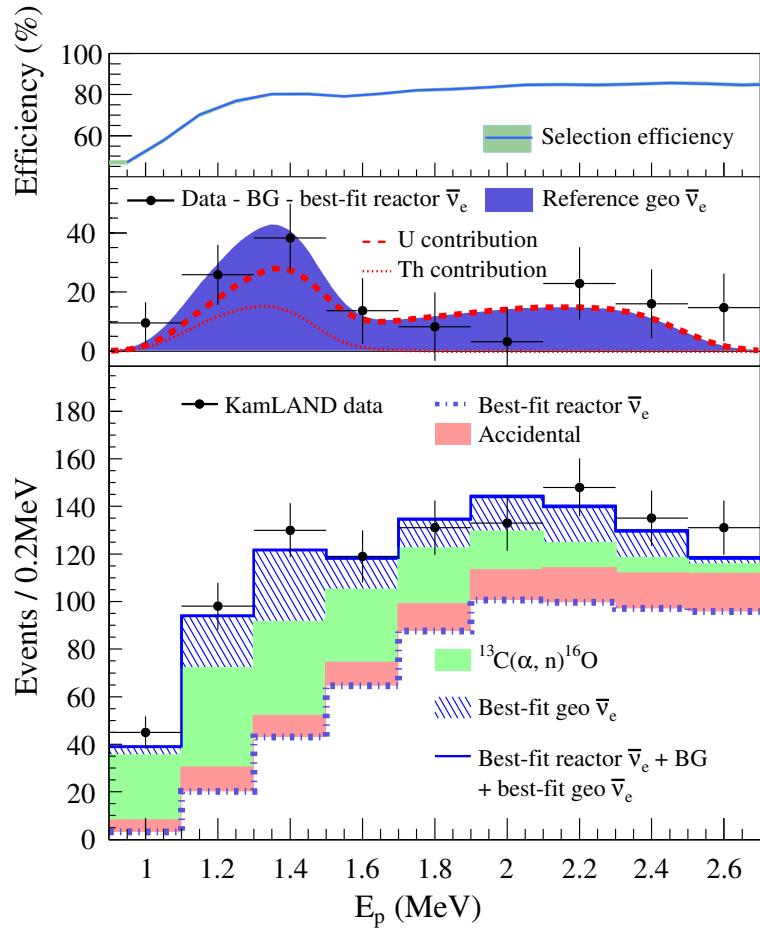
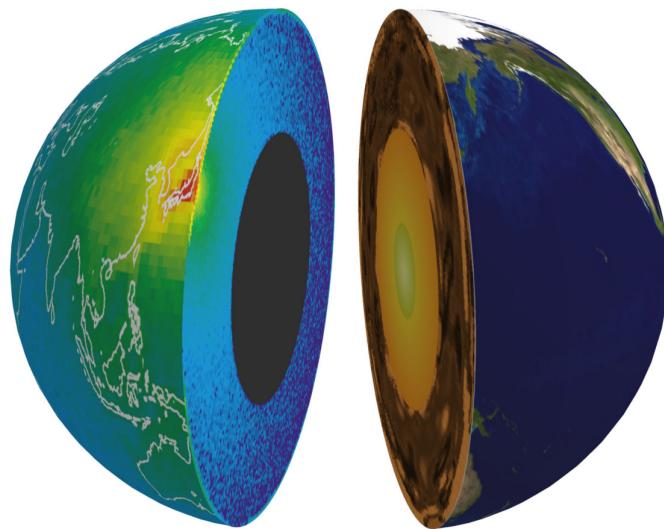
Neutrinos desde el Sol

- ¿De qué está hecho el Sol (a parte Hidrógeno y Helio)? Dos maneras para contestar:
 - estudiar su “superficie” (atmósfera);
 - observar su interior a través de las ondas sísmicas (heliosismología);
- problema: actualmente los dos métodos dan resultados contrastantes...
- los neutrinos pueden ayudar.



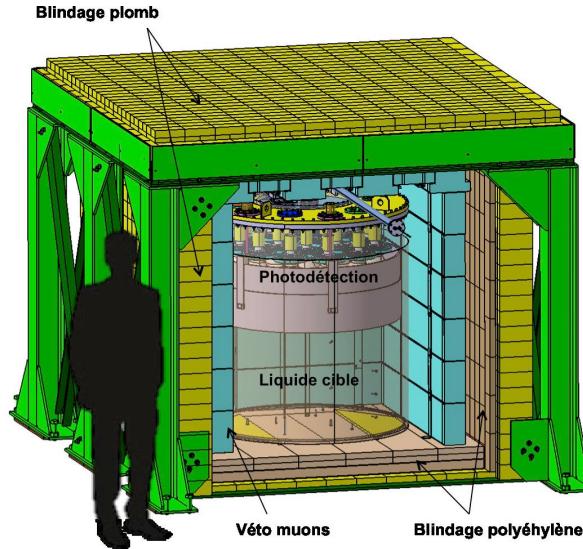
Neutrinos en geología

- KamLAND y Borexino ya han observado **geoneutrinos**;
- estas medidas nos ofrecen información directa sobre la composición del interior de la tierra.



Control de reactores nucleares

- Estudios de factibilidad de un detector de neutrinos pequeño, seguro y operable remotamente para la supervisión de reactores nucleares de futuras generaciones.



arXiv:1509.05610v2 [physics.ins-det] 24 Sep 2015

Online Monitoring of the Osiris Reactor with the Nucifer Neutrino Detector

G. Boireau, L. Bovet, A.P. Collin, G. Coullioux, M. Cribier, H. Deschamp, V. Durand, M. Fechner, V. Fischer, J. Gaffiot, N. Gérard Castaing, R. Granelli, Y. Kato, T. Lasserre, L. Latron, P. Legou, A. Letourneau, D. Lhuillier, G. Mention, T. Mueller, T.-A. Nghiêm, N. Pedrol, J. Peizer, M. Pequinot, Y. Piret, G. Prono, L. Scola, P. Starzinski, M. Vivier,¹ E. Dumontel,² C. Varignon,³ C. Buck, M. Lindner,⁴ and J. Bazonna, S. Bouvier, V.M. Bui, V. Communeau, A. Cucoanes, M. Fallot, M. Gautier, L. Giot, G. Guilloux, M. Lenoir, J. Martino, G. Mercier, T. Milleto, N. Peuvrel, A. Porta, N. Le Quéré, C. Renard, L. M. Rigaleau, D. Roy, T. Vilajosana, F. Yernia⁵
(The Nucifer Collaboration)

¹Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Centre de Saclay, DSM/IRFU, 91191 Gif-sur-Yvette, France

²Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Centre de Saclay, DEN, 91191 Gif-sur-Yvette, France

³Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, DAM, DIF, 91297 Arpajon, France
⁴Max-Planck-Institut für Kernphysik, 69029 Heidelberg, Germany

⁵SUBATECH, CNRS/IN2P3, Université de Nantes, École des Mines de Nantes, F-44320 Nantes, France

The detection of electron antineutrinos emitted in the decay chains of the fission products in nuclear reactors, combined with reactor core simulations, provides an efficient tool to assess both the thermal power and the fissile content of the whole nuclear core. This new information could be used by the International Agency for Atomic Energy (IAEA) to enhance the Safeguards of civil nuclear reactors. We report the first results of the Nucifer experiment demonstrating the concept of "neutrinoimetry" at the pre-industrialized stage. A novel detector has been designed to meet requirements discussed with the IAEA for the last ten years as well as international nuclear safety standards. Nucifer has been deployed at only 7.2m away from the Osiris research reactor core (70 MW) operating at the Saclay research center of the French Alternative Energies and Atomic Energy Commission (CEA). We describe the performances of the $\sim 1\text{ m}^3$ detector remotely operating at a shallow depth equivalent to $\sim 12\text{ m}$ of water and under intense background radiation conditions due to the very short baseline. We present the first physics results, based on 145 (106) days of data with reactor ON (OFF), leading to the detection of 40 760 candidates. The mean number of detected antineutrinos is $281 \pm 7\%$ /day, to be compared with the prediction $272 \pm 23\%$ /day. As a first societal application we quantify, on the basis of our data, how antineutrinos could be used for the Plutonium Management and Disposition Agreement.

I. INTRODUCTION

In a context of increasing needs for carbon emission-free energy, civilian nuclear energy will probably continue to expand all over the world. Globalization, as well as the goal of energy independence could lead to an increase of the list of countries aiming to acquire technological know-how in the field of civilian nuclear energy. As a consequence of the spread of practical knowledge, the possibility of diverting a nuclear facility towards non-civilian use cannot be excluded in the future. The main duty of the United Nations International Atomic Energy Agency (IAEA) is to guarantee that nations use nuclear energy only for peaceful purposes on the long term. As a consequence the agency has been evaluating the potential of new technologies for future safeguard purposes.

Neutrino detectors have unique abilities to non-intrusively monitor a nuclear reactor's operational status, thermal power and fissile content in real-time, from outside the reactor containment. More specifically the scenarios of interest are to confirm the absence of unrecorded production of fissile materials in declared reactors as well as to estimate the total burn-up? [] of a reactor core [1]. Among all applications the Plutonium Management and Disposition Agreement (PMDA) could be monitored through neutrino rate monitoring. Indeed, in this

procedure, weapon-grade plutonium could be processed into Mixed Oxide uranium-plutonium (MOX) fuel, irradiated in civil nuclear power reactors, and therefore transformed into material unusable in the fabrication of nuclear weapons.

Consequently, neutrinos could have a considerable value in bulk process and safeguards by design approaches for the current and the next generations of civil nuclear reactors.

Nucifer is a detector specifically built for long term reliable safeguards measurements in the vicinity of operating nuclear reactor cores. The Nucifer experiment aims at demonstrating the concept of "neutrinoimetry" at the pre-industrialized stage. Therefore a well-established technology and commercial components were chosen for the detection system. We report here the first detection of neutrinos with the Nucifer detector located at 7.2m away from the Osiris research reactor at CEA-Saclay and discuss a potential application for the PMDA agreement, based on the actual data.

Nucifer is installed on the concrete foundation slab of the Osiris reactor building, 11 meters beneath the water pool level, in a dedicated room next to the reactor core (see figure 1). Such a location allows to safely support the weight of the detector together with its heavy passive shielding ($\gtrsim 50\text{ tons}$). It also offers a modest overburden, reducing the muon flux by a factor of 2.7

- Prácticamente todos los resultados de los experimentos de neutrinos **solares**, **atmosféricos**, de **reactor** y de **acelerador** se explican perfectamente en el contexto de las *oscilaciones de neutrinos*;
- los neutrinos son muy difíciles de detectar, por eso no hemos conseguido estudiarlos con detalle hasta ahora;
- los neutrinos son los únicos fermiones elementales eléctricamente neutros que conocemos. Esto les proporciona propiedades especiales, por ejemplo podrían ser su propia antipartícula;
- siendo estables, producidos abundantemente en fenómenos tanto naturales como artificiales, y dotados de interacciones muy débiles, pueden proporcionar información sobre sus fuentes (AGN, Supernovas, Sol, Tierra, ...) que no se pueden obtener de ninguna otra manera.